بررسی عملکرد مقاومتی و نفوذپذیری بتن متخلخل حاوی پرلیت و لیکا برای استفاده در سیستم رواناب شهری★

(یادداشت پژوهشی)

احسان تیموری[۱] حجت کرمی[۲] سید فرهاد موسوی[۳] سعید فرزین[۴]

چکیده *با افزودن پرلیت و لیکا به بتن متخلخل، خواص فیزیکی آن بررسی گردید. مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل برای دو حالت بدون ریزدانه و حاوی ۲۰٪ ریزدانه اندازه‌گیری شد. براساس نتایج، با افزودن ۲۰٪ ریزدانه به بتن متخلخل، نفوذپذیری و تخلخل به‌شدت کاهش و مقاومت فشاری افزایش یافت. بیشترین مقاومت فشاری (۲۰/۵ مگاپاسکال) در نمونه‌های بدون ریزدانه (تیمار L10-0) و در نمونه‌های حاوی ریزدانه (۳۴/۸۵ مگاپاسکال) (تیمار L15-20) بود. نمونهٔ حاوی ۵٪ لیکا در هر دو حالت با و بدون ریزدانه دارای بیشترین نفوذپذیری و تخلخل بود. افزودنی لیکا عملکرد بهتری نسبت به افزودنی پرلیت داشت.*

واژه‌های کلیدی بتن متخلخل، لیکا، پرلیت، سیستم رواناب شهری، خواص فیزیکی.

Performance Improvement of Urban Runoff System by Using Additive-Contained Pervious Concrete

E. Teymouri H. Karami S. F. Mousavi S. Farzin

Abstract *By adding perlite and leca to porous concrete, its physical characteristics were studied. Compression strength, hydraulic conductivity and porosity of two porous concretes (without fine grains and with 20% fine grains) were measured. Results showed that adding 20% fine grains to porous concrete highly decreases hydraulic conductivity and porosity and increases compression strength. The highest compression strength (20.5 MPa) was seen in without-fine-grains samples (L10-0 treatment) and in with-fine-grains samples (34.85 MPa) in L15-20 treatment. The L5-0 treatment in both cases of with/without additives, had the highest hydraulic conductivity and porosity. Leca had better performance than perlite.*

Key Words Porous Concrete, Leca, Perlite, Urban Runoff, Physical Characteristics.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۳/۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۵/۹/۱۳ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان. Email: Teymuri.e91@semnan.ac.ir
(۲) استادیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
(۳) استاد، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
(۴) استادیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

مقدمه

ویژگی منحصربه‌فرد بتن که آن را تطبیق‌پذیر می‌سازد این است که، خانواده‌ای متشکل از طیف وسیعی از مواد با رنگ، چگالی، استحکام، دوام و مشخصات مختلف را شامل می‌شود که می‌تواند برای کاربردهای مختلف استفاده شود. امروزه بتن سازه‌ای با دامنهٔ چگالی بین ۱۸۰۰ تا ۳۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب شامل بتن سبک، بتن معمولی و بتن سنگین قابل ساخت می‌باشد. بتن سبک، بتنی بسیار قابل کاربرد برای مصارف سازه‌ای است که فاکتورهای فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی را بهبود می‌بخشد و می‌تواند به‌عنوان یک مادهٔ غالب برای ساخت‌وساز در هزارهٔ جدید مورد توجه قرار گیرد. تنها محدودیت پیش روی استفاده از بتن سبک، استفاده از سبک‌دانه‌ها می‌باشد که امروزه با تمهیدات خاص و استفاده از موادی همچون خاکستر بادی می‌توان به مقاومتی بین ۳۰ تا ۸۰ مگاپاسکال نیز دست یافت [1].

پدیدهٔ نفوذناپذیر بودن معابر شهری، مشکلات بسیاری را در پی داشته‌است که از آن جمله می‌توان به آب‌گرفتگی معابر در هنگام وقوع بارندگی اشاره نمود که به‌نوبهٔ خود می‌تواند تردد عابرین پیاده و حتی خودروها را با مشکل مواجه سازد. به‌منظور مدیریت هرچه بهتر رواناب‌های سطحی در شهرها، از راهکارهای مختلفی نظیر ساخت نهرها و نفوذپذیر نمودن سطح روسازی استفاده می‌گردد. باتوجه به لزوم استفاده از رواناب سطحی برای تغذیهٔ سفره‌های آب زیرزمینی و حفظ تعادل زیست‌محیطی مناطق شهری، امروزه استفاده از تکنیک روسازی متخلخل در معابر شهری، که نوعی از کاربردهای بتن سبک است، از اهمیت ویژه‌ای در کشورهای مختلف برخوردار می‌باشد؛ چرا که این روش می‌تواند از طریق حذف بخشی از آلاینده‌های رواناب، در بهبود کیفیت آبی که به لایه‌های خاک زیرین نفوذ می‌کند نیز مؤثر باشد.

بتن متخلخل (Porous Concrete) به مخلوطی از مصالح شامل سیمان پرتلند، درشت‌دانه، مقدار کم یا فاقد ریزدانه، مواد افزودنی و آب که دارای اسلامپ صفر و دانه‌بندی باز باشد، اطلاق می‌گردد. بتن متخلخل به‌دلیل مقدار کم ریزدانه، دارای ساختاری متشکل از حفره‌های به‌هم پیوسته می‌باشد که امکان عبور سریع آب از میان حفرات را فراهم می‌سازد. تخلخل این نوع بتن بین ۱۵ تا ۲۵ درصد متغیر می‌باشد [2]. اگرچه بتن متخلخل از اواسط قرن ۱۹ وجود داشته‌است، اما از سال ۱۹۸۰ در بسیاری از کشورها، به‌ویژه ایالات متحدهٔ آمریکا و ژاپن، مورد استفاده قرار گرفته‌است. روسازی با بتن متخلخل به‌دلیل سازگاری با محیط‌زیست جایگزین مناسبی نسبت به سیستم روسازی آسفالتی و بتن معمولی است [3].

از مزایای بتن متخلخل می‌توان به روسازی سازگار با محیط‌زیست، کاهش آلودگی صوتی، کاهش شیب حرارتی، کنترل سیلاب، افزایش مکان‌های مساعد برای احداث پارکینگ و اجازهٔ عبور آب و هوا برای رسیدن به ریشهٔ درختان اشاره کرد [2]. در روزهای بارانی، روی این نوع روسازی هیچ آبی جمع نمی‌شود و همچنین در شب کاهش تابش نور خیره‌کننده‌ای وجود ندارد و باعث بهبود ایمنی و راحتی رانندگان می‌شود [4].

بتن متخلخل از نظر زیست‌محیطی مزایای فراوانی دارد و امروزه توجه خاصی به آن می‌شود. مورد استفادهٔ این نوع بتن اکثرا در مناطق با بارندگی زیاد، فرودگاه‌ها، پارکینگ‌ها، پاسیوها، گذرگاه‌های عابر پیاده و جاده‌های با ترافیک سبک در قالب لایهٔ روسازی به‌منظور کاهش رواناب و افزایش نفوذپذیری و همچنین به‌عنوان زهکش در لایه‌های زیرسازی راه‌ها و سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد [5, 6]. نمونه‌ای از بتن متخلخل در شکل (۱) آورده شده‌است.

کولینز و همکاران (۲۰۰۸) در تحقیقی در شمال شرقی کارولینا، قسمتی از یک پارکینگ شامل ٤ نوع روسازی نفوذپذیر مختلف و آسفالت استاندارد را در مدت زمان یک سال ازنظر تغییرات هیدرولوژیک در

حجم رواناب سطحی، حجم خروجی کل، نرخ اوج جریان و زمان اوج جریان مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که روسازی‌های نفوذپذیر تقریبا عملکرد مشابهی داشتند، اما به‌طور قابل‌توجهی با آسفالت متفاوت بودند [7].



شکل ۱ نمونه‌ای از بتن متخلخل

آلیت و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی، به بررسی ۵ نوع رویهٔ بتنی متخلخل متفاوت در ٤٥ پارکینگ برای مدیریت رواناب شهری در شمال اسپانیا پرداختند. هدف این تحقیق دست یافتن به روسازی بتنی متخلخل مناسب برای ذخیرهٔ آب بود، و درنهایت روسازی بتن متخلخل بهینه برای آبیاری حداقل یک ماه فضای سبز معرفی گردید [8].

حسامی و احمدی (۱۳۹٤) در پژوهشی، از ماسه و خاکستر پوستهٔ برنج به‌منظور تقویت خمیر سیمان برای روسازی بتنی متخلخل و همچنین از الیاف پلی‌فنیلن سولفاید (PPS) به‌منظور بهبود خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل استفاده کردند. در این پژوهش، نسبت بهینهٔ آب به سیمان ۰/۳۳ به‌دست آمد. همچنین، نفوذپذیری و تخلخل در کلیهٔ طرح‌های اختلاط این پژوهش به‌ترتیب بین ۰/۰۸ تا ۰/٤۸ سانتی‌متر بر ثانیه و ۹ تا ۲۹ درصد قرار داشت و درصد بهینهٔ خاکستر پوستهٔ برنج برای نمونه‌های حاوی الیاف بین ۸ تا ۱۰ درصد بود [۹].

بررسی لیکا و پرلیت از دید زیست‌محیطی و اثر آنها در حذف آلودگی‌ها

آردالی و همکاران (۲۰۱٤) در پژوهشی، از پرلیت منبسط‌شده برای حذف مس از شیرابهٔ زباله‌های صنعتی استفاده کردند و به‌خوبی توانایی پرلیت در حذف مس مشخص گردید. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت پرلیت منبسط‌شده، میزان حذف مس افزایش یافت. همچنین، مدل جنبشی مرتبهٔ دوم با رفتار دینامیک جذب مس تطبیق بسیار خوبی داشت (R^2=0.9998) [10].

نادری و بنیادی (۱۳۹۱) در تحقیقی، به بررسی مقاومت فشاری بتن سبک حاوی سنگدانه‌های پوکهٔ معدنی اسکریا، لیکا و پرلیت بااستفاده از روش پیچش پرداختند. نتایج نشان داد که پوکهٔ معدنی اسکریا، لیکا و پرلیت به‌ترتیب به‌دلیل داشتن وزن مخصوص بیشتر دارای مقاومت فشاری بیشتری بودند [۱۱].

بهمنی و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی میزان حذف سورفکتانت آنیونی LABS با افزودنی‌های معدنی پرلیت و کربن فعال پرداختند. بهترین شرایط برای جذب سطحی ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر سورفکتانت در زمان ۱۰ دقیقه، دمای ۲۵ درجهٔ سلسیوس و pH برابر ۷ برای ۰/۸ گرم کربن فعال با ۹۸٪ حذف سورفکتانت به‌دست آمد. بازده حذف بااستفاده از افزودنی معدنی پرلیت نیز در شرایط بهینه به‌دست آمد که راندمان حذف کمتری از کربن فعال داشت [۱۲].

محققان، در گذشته، مطالعات زیادی درمورد روسازی‌های نفوذپذیر از نظر عملکردی، دوام، نگه‌داری و نفوذپذیری انجام داده‌اند. همچنین، بااستفاده از افزودنی‌های مختلف سعی در کاهش آلودگی‌های موجود به روش‌های گوناگون داشته‌اند. لیکا و پرلیت از مواد معدنی فراوان و ارزان‌قیمت می‌باشند که خاصیت جذب آلودگی‌ها را دارند؛ اما تاکنون کاربرد آنها در بتن متخلخل بررسی نشده‌است. برای استفاده از بتن متخلخل حاوی افزودنی در سیستم رواناب شهری ابتدا

بایستی پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی بتن متخلخل بررسی شود و سپس بسته به کاربرد آن، به مباحث کیفی پرداخته شود. ازاین‌رو، در این تحقیق، به بررسی اثر اضافه‌کردن افزودنی‌های لیکا و پرلیت به بتن متخلخل و بررسی خواص فیزیکی آن پرداخته شده‌است تا بتوان به‌صورت بهینه در سیستم رواناب شهری از آنها استفاده کرد.

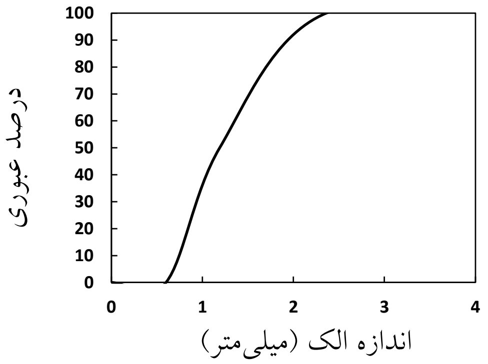
طرح آزمایشگاهی

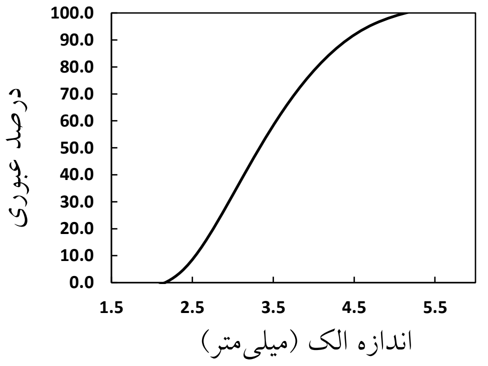
مشخصات مصالح مصرفی

لیکا. مواد خامی هستند که برای سنگدانه‌های سبک سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالت معمول، از ته‌نشینی مصالح طبیعی مانند رس، شیل و اسلیت که دارای مقدار زیادی سیلیس می‌باشند، تشکیل می‌شوند. دو نوع از روش‌های تولید آنها روش کورهٔ دوار و روش رسوب‌گذاری است. در هر دو روش، به مواد خام تا هنگام انبساط، گرما داده می‌شود. در فرایند انبساط، گرما تا زمانی ادامه می‌یابد که گازهای درونی آنها آزاد شوند و مصالح به‌شکل نرم و انعطاف‌پذیر درآیند، ولی به‌طور کامل ذوب نشوند. حباب گازهای درونی، توده‌ای از سلول‌های هوای جدا از هم ایجاد می‌کند و پس از سردشدن، این مواد در درون آنها باقی می‌مانند. بنابراین، مواد خام منبسط می‌شوند و سنگدانه‌هایی با وزن مخصوص کمتر به‌دست می‌آید [13].

پرلیت. برای به‌دست آوردن سبک‌دانهٔ پرلیت از سنگ پرلیت، نخست سنگ پرلیت را در داخل کوره‌های دوار به دمای ۸۵۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس می‌رسانند و سنگ به‌صورت شیشه‌ای نرم حاصل می‌شود. در این حالت، آب از لابه‌لای سنگ به‌صورت کامل تخلیه می‌شود و توده‌های سنگ به‌اندازهٔ ۷ تا ۱۵ برابر افزایش حجم پیدا می‌کنند. مصالح جدید که ازنظر شکل بزرگ و حجیم شده‌اند، سفید رنگ و در ابعاد و قطعات بزرگ و نامرتب هستند و سفیدی آنها به‌دلیل بخارهای حاصل از تبخیر مایعات و آب داخل سنگ می‌باشد. وزن مخصوص سنگ پرلیت در حالت خام و منبسط‌نشده در حدود ۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد؛ ولی وزن مخصوص حالت منبسط‌شدهٔ آن به‌صورت سبک‌دانهٔ پرلیتی بین ۳۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد [14].

برای انجام تحقیق حاضر، سنگدانهٔ مورد نیاز از استان سمنان و سیمان مصرفی (تیپ ۵) از کارخانهٔ سیمان تهران تهیه شد. در این پژوهش، افزودنی‌های لیکا و پرلیت (با درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵) در طرح اختلاط اولیهٔ بتن جایگزین سنگدانه شدند. اثر اضافه‌کردن ریزدانه بر خواص فیزیکی بتن متخلخل نیز بررسی شد. دانه‌بندی مورد استفاده برای سنگدانه و افزودنی‌ها در شکل (۲) و افزودنی‌های مصرفی در شکل (۳) آورده شده‌است.





شکل ۲ دانه‌بندی افزودنی‌ها (سمت راست) و دانه‌بندی سنگدانهٔ مصرفی(سمت چپ) (d_{50}=۷/۱ mm)



(الف)



(ب)

شکل ۳ الف) لیکا و ب) پرلیت

طرح اختلاط بتن

برای ساخت نمونه‌های بتن متخلخل معمولی، طرح اختلاط اولیه‌ای باتوجه به استاندارد ACI 211/3R [15] درنظر گرفته شد که در آن مقدار سنگدانه و سیمان به‌ترتیب ۱٤۰۰ و ۳۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت آب به سیمان (W/C)، برای تمامی نمونه‌ها ثابت و برابر ۰/۳۸ بود. علاوه‌بر این، با اضافه کردن ۲۰٪ وزنی ریزدانه به طرح اختلاط اولیه، مقایسه‌ای از نظر پارامترهای مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل با نمونه‌های بدون ریزدانه انجام شد. تیمارهای آزمایش، کد هر تیمار، درصد ریزدانه و درصد افزودنی در جدول (۱) ارائه شده‌است. برای هر تیمار، ۳ تکرار درنظر گرفته شد. به‌دلیل سهولت در انجام آزمایش‌های مربوط به تخلخل و ضریب نفوذپذیری، از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر با ۳ تکرار و برای دقیق‌بودن آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر براساس استاندارد موردنظر استفاده شد.

جدول ۱ طرح اختلاط استفاده‌شده در بتن متخلخل

نام نمونه	علامت اختصاری	درصد ریزدانه	درصد وزنی افزودنی
شاهد (صفر)	C-0	۰	۰
لیکا ۰-۵	L5-0*	۰	۵
لیکا ۰-۱۰	L10-0	۰	۱۰
لیکا ۰-۱۵	L15-0	۰	۱۵
پرلیت ۰-۵	Pe5-0	۰	۵
پرلیت ۰-۱۰	Pe10-0	۰	۱۰
پرلیت ۰-۱۵	Pe15-0	۰	۱۵
شاهد (۲۰)	C-20	۲۰	۰
لیکا ۲۰-۵	L5-20	۲۰	۵
لیکا ۲۰-۱۰	L10-20	۲۰	۱۰
لیکا ۲۰-۱۵	L15-20	۲۰	۱۵
پرلیت ۱۰-۵	Pe5-20	۲۰	۵
پرلیت ۱۰-	Pe10-20	۲۰	۱۰
پرلیت ۱۰-	Pe15-20	۲۰	۱۵

*عدد بعد از خط تیره نشان‌دهندهٔ درصد ریزدانه و عدد چسبیده به حرف انگلیسی، درصد افزودنی می‌باشد

روش آزمایش

در این پژوهش، آزمایش‌های مربوط به مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل باتوجه به استانداردهای BS 1881 [16]، ACI 522R [4] و ASTM C1754 [17] انجام گرفت. میزان تخلخل نمونه‌های آزمایشی، از روش اختلاف بین وزن غوطه‌وری و وزن خشک نمونه محاسبه شد. ابتدا نمونه به‌مدت ۲٤ ساعت در گرم‌خانه با دمای ۱۰۵ درجهٔ سلسیوس نگه‌داری شد. با توزین آن، وزن خشک W_2 به‌دست آمد. سپس، نمونهٔ خشک‌شده در آب وزن شد و وزن غوطه‌وری آن W_1 به‌دست آمد. بااستفاده از رابطهٔ (۱) تخلخل نمونه محاسبه گردید:

$$A_t = (1-(\frac{W_2 - W_1}{\rho_w \times V}))\times 100 \quad (۱)$$

که A_t تخلخل کل برحسب درصد، W_2 وزن نمونه بعد از خشک‌شدن در گرم‌خانه (گرم)، W_1 وزن غوطه‌وری نمونه که بااستفاده از ترازوی ارشمیدس به‌دست می‌آید (گرم)، V حجم نمونه (سانتی‌متر مکعب) و ρ_w دانسیتهٔ آب در دمای ۲۰ ^{o}C (گرم بر سانتی‌متر مکعب) است.

بهترین توصیف برای بتن متخلخل و نفوذپذیر، خواص نفوذپذیری و تخلخل آن است. نفوذپذیری بازتابی از ارتباط میان منافذ می‌باشد. برای انجام تست نفوذپذیری، دستگاهی به‌روش بار افتان در آزمایشگاه سازهٔ دانشگاه سمنان ساخته شد (شکل ٤) که نمونه‌های مکعبی بتن متخلخل ساخته‌شده در آن جای گیرند و آب‌بندی لازم نیز امکان‌پذیر باشد. میزان ضریب نفوذپذیری طبق رابطهٔ (۲) محاسبه شد:

$$K = \frac{al}{At} Ln(\frac{h_1}{h_2}) \quad (۲)$$

در این رابطه، K نفوذپذیری (میلی‌متر بر ثانیه)، a سطح مقطع محفظهٔ شیشه‌ای (میلی‌متر مربع)، L طول نمونه (میلی‌متر)، A سطح مقطع نمونهٔ بتن (میلی‌متر مربع)، t زمان افت بار آب از h_1 به h_2 (ثانیه)، h_1 ارتفاع اولیهٔ ستون آب (میلی‌متر) و h_2 ارتفاع نهایی ستون آب (میلی‌متر) می‌باشد.

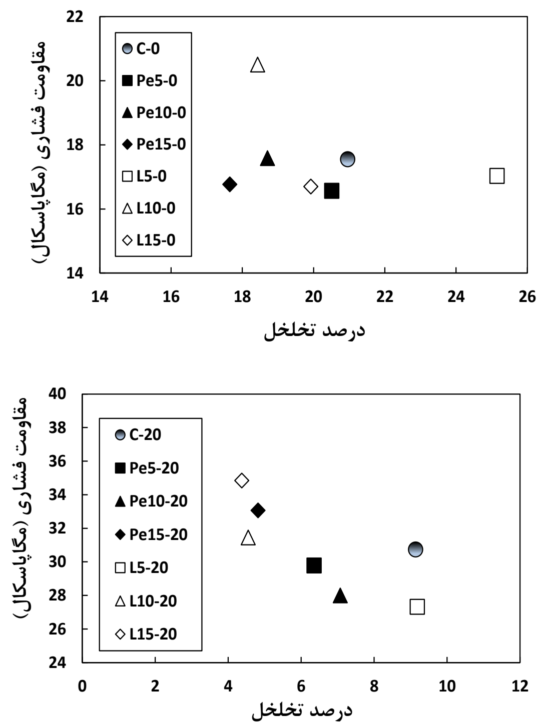


شکل ٤ دستگاه اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری و نمونهٔ قرار داده‌شده در دستگاه

نتایج و بحث

اثر لیکا و پرلیت بر مقاومت فشاری بتن متخلخل

در شکل (٥) مقاومت فشاری برحسب درصد تخلخل برای نمونه‌های بدون ریزدانه برای افزودنی‌های پرلیت و لیکا آورده شده‌است.



شکل ٥ مقاومت فشاری برحسب درصد تخلخل برای نمونه‌های بدون ریزدانه (سمت راست) و مقاومت فشاری برحسب درصد تخلخل برای نمونه‌های حاوی ۲۰٪ وزنی ریزدانه (سمت چپ)

همان‌گونه که در شکل (٥) برای نمونه‌های بدون ریزدانه مشاهده می‌شود، با اضافه کردن پرلیت و لیکا به بتن متخلخل، مقاومت فشاری نسبت به نمونهٔ مرجع کاهش پیدا کرده‌است که این کاهش با وزن مخصوص کم پرلیت (۰/۲۰۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و لیکا (۰/٤٥۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) قابل توجیه است. نمونهٔ L10-0 دارای بیشترین مقاومت فشاری (۲۰/٥ مگاپاسکال) و نمونهٔ Pe5-0 دارای کمترین مقاومت فشاری (١٦/٥٦ مگاپاسکال) می‌باشند.

در شکل (٥) برای نمونه‌های دارای ریزدانه،

مشاهده می‌شود که با اضافه کردن درصد افزودنی، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش و درصد تخلخل کاهش می‌یابد. این اتفاق به‌دلیل پرکردن خلل و فرج بتن توسط جاذب‌های ریزدانهٔ پرلیت و لیکا می‌باشد که علی‌رغم داشتن وزن مخصوص کم، به‌خوبی نقش پرکنندگی را در بتن متخلخل ایفا کرده‌اند.

درمجموع، افزودنی لیکا دارای عملکرد مقاومتی بهتری نسبت به افزودنی پرلیت می‌باشد.

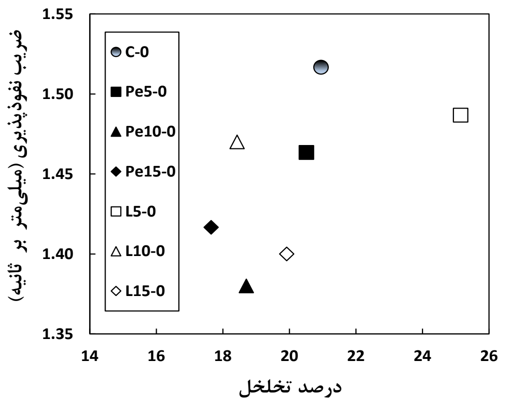
اثر پرلیت و لیکا بر ضریب نفوذپذیری بتن متخلخل

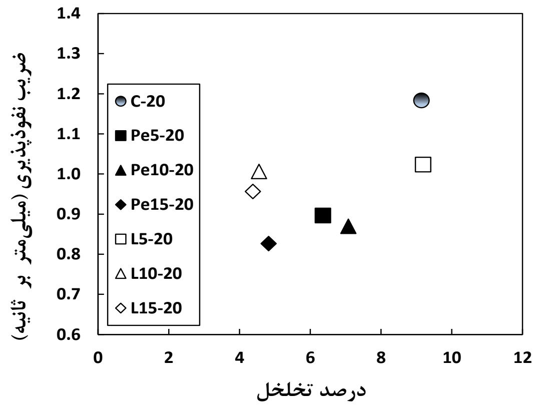
در شکل (٦) ضریب نفوذپذیری برحسب درصد تخلخل برای نمونه‌های بدون ریزدانه برای افزودنی‌های پرلیت و لیکا آورده شده‌است.

از شکل (٦) مشاهده می‌شود که برای نمونه‌های بدون ریزدانه، با افزایش درصد افزودنی، درصد تخلخل کاهش می‌یابد. با اضافه‌شدن جاذب برای تمامی نمونه‌ها، ضریب نفوذپذیری نسبت به نمونهٔ مرجع کاهش یافته‌است. بیشترین و کمترین ضریب نفوذپذیری به‌ترتیب مربوط به نمونه‌های L5-0 (۱/٤٨٧ میلی‌متر بر ثانیه) و Pe10-0 (۱/۳۸ میلی‌متر بر ثانیه) می‌باشد.

در نمونه‌های حاوی ۲۰٪ وزنی ریزدانه مشاهده می‌شود که با اضافه کردن افزودنی ریزدانه به بتن متخلخل و همچنین افزایش درصد افزودنی، ضریب نفوذپذیری برای تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونهٔ مرجع کاهش یافته‌است. بیشترین و کمترین ضریب نفوذپذیری در نمونه‌های حاوی ریزدانه به‌ترتیب مربوط به L5-20 (۱/۰۲۳ میلی‌متر بر ثانیه) و Pe15-20 (۰/۸۲۷ میلی‌متر بر ثانیه) می‌باشد.

با اضافه‌کردن ریزدانه به نمونهٔ بتن متخلخل، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل نسبت به نمونه‌های بدون ریزدانه کاهش چشم‌گیری پیدا کرد؛ به‌طوری‌که برای نمونهٔ حاوی ۱۵٪ وزنی پرلیت ازنظر ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل، و برای نمونه‌های حاوی ۲۰٪ ریزدانه به‌ترتیب کاهش ٤١/٦٤ و ۷۲/۷ درصدی نسبت به نمونه‌های بدون ریزدانه مشاهده شد.





شکل ٦ ضریب نفوذپذیری برحسب درصد تخلخل برای نمونه‌های بدون ریزدانه (سمت راست) و نمونه‌های حاوی ۲۰٪ وزنی ریزدانه (سمت چپ)

درمجموع، افزودنی لیکا دارای ضریب نفوذپذیری بیشتری نسبت به افزودنی پرلیت بود.

در جدول (۲) اطلاعات مربوط به متوسط مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل برای تمامی نمونه‌ها آورده شده‌است تا مقایسه‌ای کلی بین نمونه‌ها صورت گیرد و همچنین تأثیر اضافه‌کردن ریزدانه به بتن متخلخل به‌صورت محسوس‌تری بیان شود.

جدول ۲ خواص فیزیکی متوسط نمونه‌ها و تغییرات آنها نسبت به نمونهٔ مرجع

ردیف	کد آزمایشگاهی	مقاومت فشاری متوسط (MPa)	ضریب نفوذپذیری متوسط (mm/s)	درصد تخلخل متوسط	بیشترین اختلاف با نمونهٔ مرجع		
					مقاومت فشاری	ضریب نفوذپذیری	درصد تخلخل
۱	C-0	۱۷/۵۵	۱/۵۱۷	۲۰/۹۶	–	–	–
۲	L5-0	۱۷/۰۳	۱/۴۸۷	۲۵/۱۵	**-۲/۹۶	-۱/۹۷	۱۶/۶۶
۳	L10-0	۲۰/۵	۱/۴۷	۱۸/۴۳	۱۴/۳۹	-۳/۰۹	-۱۲/۰۷
۴	L15-0	۱۶/۷	۱/۴	۱۹/۹۲	-۴/۸۴	-۷/۷۱	-۴/۹۶
۵	Pe5-0	۱۶/۵۶	۱/۴۶۳	۲۰/۵۱	-۵/۶۴	-۳/۵۶	-۲/۱۴
۶	Pe10-0	۱۷/۵۸	۱/۳۸	۱۸/۷۱	۰/۱۷	-۹/۰۳	-۱۰/۷۳
۷	Pe15-0	۱۶/۷۶	۱/۴۱۷	۱۷/۶۵	-۴/۵	-۶/۵۹	-۱۵/۷۹
۸	C-20	۳۰/۷۳	۱/۱۸۳	۹/۱۴	*۴۲/۸۸	-۲۲/۰۲	-۵۶/۳۹
۹	L5-20	۲۷/۳۲	۱/۰۲۳	۹/۱۹	-۱۱/۰۹	-۱۳/۵۲	۰/۵۴
۱۰	L10-20	۳۱/۱۳	۱/۰۰۷	۵/۶	۱/۲۸	-۱۴/۸۷	-۳۸/۷۳
۱۱	L15-20	۳۳/۲۱	۰/۹۵۷	۴/۳۷	۴/۵۹	-۱۹/۱	-۵۲/۱۸
۱۲	Pe5-20	۲۹/۷۹	۰/۸۹۷	۶/۳۶	-۳/۰۵	-۲۴/۱۷	-۳۰/۴۱
۱۳	Pe10-20	۳۱/۳	۰/۸۷	۷/۰۷	۱/۸۲	-۲۶/۴۶	-۲۲/۶۴
۱۴	Pe15-20	۳۳/۰۷	۰/۸۲۷	۴/۸۲	۷/۰۷	-۳۰/۰۹	-۴۷/۲۶

* تغییرات نمونهٔ مرجع حاوی ریزدانه نسبت به نمونهٔ مرجع بدون ریزدانه درنظر گرفته شده‌است.

** علامت منفی نشان‌دهندهٔ کاهش پارامتر نسبت به نمونهٔ مرجع می‌باشد.

همان‌گونه که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، درصد تخلخل نمونه‌های بدون ریزدانه در بازهٔ ۱۵ تا ۲۵ درصد قرار می‌گیرد؛ اما در نمونه‌های حاوی ریزدانه، تخلخل به‌شدت کاهش پیدا کرده‌است. البته باتوجه به شرایط و منطقهٔ موردنظر می‌توان از نمونهٔ حاوی ریزدانه، با درصد مناسب، استفاده کرد.

افزایش مقاومت فشاری، کاهش ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل با اضافه کردن ریزدانه برای نمونهٔ مرجع به‌ترتیب ۴۲/۸۸، ۲۲/۰۲ و ۵۶/۳۹ درصد می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که با کم‌وزیاد کردن درصد ریزدانه، یا تغییر نوع دانه‌بندی، می‌توان به خواص فیزیکی دل‌خواه دست پیدا کرد.

باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده درخصوص مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل، استفاده از بتن متخلخل به‌همراه افزودنی می‌تواند راهکاری برای استفاده مجدد از رواناب‌های سطحی باشد. علاوه‌بر این، می‌توان از پدیدهٔ آب‌گرفتگی معابر و پارکینگ‌های شهری در هنگام بارندگی جلوگیری کرد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، استفاده از لیکا و پرلیت به‌عنوان افزودنی به بتن متخلخل اضافه گردید تا تأثیر آنها بر پارامترهای مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل بررسی گردد. اهم نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش عبارتند از:

۱. افزودنی لیکا ازنظر مقاومتی، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل عملکرد بهتری از افزودنی پرلیت دارد اما این اختلاف ازنظر مقاومتی چندان فاحش

نیست.

۲. اضافه کردن ۲۰٪ ریزدانه به طرح اختلاط بتن متخلخل اولیه ۴۲/۸۸٪ افزایش مقاومت فشاری، ۲۲/۰۲٪ کاهش ضریب نفوذپذیری و ۵۶/۳۹٪ کاهش تخلخل را به‌همراه دارد. افزودن ۲۰٪ وزنی ریزدانه، ایراد مقاومت فشاری کم بتن متخلخل را به‌خوبی بهبود داده‌است؛ اما ازطرفی باعث کاهش چشم‌گیر ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل شده‌است که می‌توان با تغییر درصد ریزدانه، به مقاومت فشاری و نفوذپذیری مورد نظر دست یافت.

۳. اضافه کردن پرلیت و لیکا در نمونه‌های حاوی ۲۰٪ وزنی ریزدانه نسبت به نمونه‌های بدون ریزدانه، تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری ندارد، اما ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل افت زیادی می‌کند. این امر نشان می‌دهد که اضافه کردن ریزدانه به بتن متخلخل جاذب در کاهش تخلخل و ضریب نفوذپذیری تأثیر بیشتری دارد.

٤. در نمونه‌های بدون ریزدانه، بیشترین و کمترین ضریب نفوذپذیری به‌ترتیب مربوط به نمونه‌های L5-0 (۱/٤۸۷ میلی‌متر بر ثانیه) و Pe10-0 (۱/۳۸ میلی‌متر بر ثانیه) می‌باشد.

۵. بیشترین و کمترین ضریب نفوذپذیری در نمونه‌های حاوی ریزدانه به‌ترتیب مربوط به L5-20 (۱/۰۲۳ میلی‌متر بر ثانیه) و Pe15-20 (۰/۸۲۷ میلی‌متر بر ثانیه) می‌باشد.

سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله از مسئول آزمایشگاه سازهٔ دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، جناب آقای مهندس محمد بخشایی و همچنین خانم مهندس مهسا دوست‌محمدی به‌پاس همکاری ارزشمندشان قدردانی می‌گردد.

مراجع

1. Bamforth, P.B., "The Properties of High Strength Lightweight Concrete", Concrete, Vol. 21, No. 4, pp. 8-9, (1987).
2. ACI Committee 522, "Pervious Concrete", ACI 522R-06 Report, (2006).
3. Ferguson, B. K., "Pervious Pavement", Taylor and Francis Group, New York, (2005).
4. Yang, J. and Jiang, G., "Experimental Study on Properties of Pervious Concrete Pavement Materials", Cement and Concrete Res, Vol. 33, pp. 381-386, (2003).
5. Harrisburg, P. A. "The Pennsylvania Handbook of Best Management Practice for Developing Areas", Pennsylvania Department of Environmental Protection, (1998).
6. Tennis, P.D., M. L. Leming and Akers. D.J.و "Pervious Concrete Pavements", EB302, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, (2004).
7. Collins, K. A., Hunt, W. F., and Hathaway, J. M., "Hydrologic Comparison of Four Yypes of Permeable Pavement and Standard Asphalt in Eastern North Carolina", J. Hydrol. Eng, Vol. 13, No. 12, Pp. 1146-1157, (2008).
8. Ullate, E. G., Lopez, E. C., Fresno, D. C. and Bayon J. R., "Analysis and Contrast of Different Pervious Pavements for Management of Storm-water in a Parking Area in Northern Spain", Water Resour. Manage, Vol. 25, pp. 1525-1535, (2011).

۹. حسامی، سعید و احمدی، سعید، «ارزیابی روسازی بتنی متخلخل سازگار با محیط‌زیست باا ستفاده از خاک ستر پو ستهٔ برنج»، مهند سی زیرساخت‌های حمل و نقل، جلد اول، شمارهٔ دو، صص. ٦٣–٧٦، (١٣٩٤).

10. Ardali, Y., Turan, N. G. and Temel, F. A., "Cu (II) Removal from Industrial Waste Leachate by Adsorption Using Expanded Perlite", *J. Inst. Nat. Appl. Sci*, Vol. 19, No. (1-2), pp. 54-61, (2014).

۱۱. نادری، محمود و بنیادی، علیرضا، «مقایسهٔ طرح اختلاط و مقاومت فشاری بتن‌های سبک ساخته‌شده با سبک‌دا نه های لی کا، ا سکریا و پرلیت بااستفاده از روش پیچش»، نشریهٔ مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد، دورهٔ ۲۳، شمارهٔ ۲، صص. ۷۱–۹۰، (۱۳۹۱).

۱۲. بهمنی، منوچهر، راه‌نورد کیسمی، زهرا، علیا، محمدابراهیم و کاسه‌گری، حسین، «بررسی م یزان حذف سورفاکتانت آ نیونی LABS با جاذب‌های معدنی پرلیت و کربن فعال»، نشریهٔ پژوهش‌های کاربردی در شیمی، سال ۷، شمارهٔ ۲، صص. ٦٧–٧٣، (١٣٩٢).

13. Imura, S., Kaniva, H., Horio, M., and Kimura, K., "A Novel Fluidized Bed Manufacturing of High Performance Artificial Lightweight Aggregate Concrete", Kristiansand, Norway, pp. 611-613, (2000).

14. STM-C332, "Standard Specification for Lightweight Aggregate for Institute Concrete", American Society of Testing Materials, (1999).

15. ACI Committee 211, "Guide for Selecting Proportions for No-slump Concrete", ACI 211.3R Report, (2006).

16. British Standard, Testing Concrete, "Part 108. Method for making test cubes from fresh concrete", BS 1881: Part 108, (1983).

17. ASTM C1754/C1754M-12, "Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete", ASTM International, USA, (2012).